



# ДЕФОРМАЦИОННЫЙ КРИТЕРИЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ УПРОЧНЕНИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ПРОКОВКОЙ

**В. А. ДЕГТЯРЕВ**, канд. техн. наук, **Б. С. ШУЛЬГИНОВ**, д-р техн. наук  
(Ин-т проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины),

**В. В. КНЫШ**, канд. физ.-мат. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Приведены результаты испытаний на усталость сварных стыковых соединений после высокочастотной механической проковки с учетом различных технологий их подготовки. Показано, что одним из объективных методов оценки эффективности обработки сварных соединений является измерение глубины канавки зоны наклепа.

*Ключевые слова:* дуговая сварка, подготовка образца, сварное соединение, высокочастотная механическая проковка, глубина канавки, остаточные напряжения, кривая усталости, предел выносливости, долговечность

Необходимость повышения прочности и уменьшения вероятности разрушений машин и сооружений способствовала разработке большого количества способов упрочнения сварных соединений [1, 2] таких, как механическая зачистка шва, аргонодуговая обработка, обработка взрывом, виброобработка и другие способы обработки, основной целью которых является повышение их сопротивления усталости. Действие одних способов обработки направлено на уменьшение концентрации напряжений [3], других — на уменьшение остаточных напряжений растяжения [4]. Однако сложность прогнозирования циклической долговечности конструкций в связи с влиянием разных конструкционных и технологических факторов требует развития новых методов повышения прочности сварного соединения. В последнее десятилетие все большую актуальность приобретает высокочастотная механическая проковка (ВМП) вдоль линии сплавления металла сварного шва с основным металлом [5], которая характеризуется высокой эффективностью упрочнения разных типов сварных соединений при ее малой трудоемкости. Этот способ обработки достаточно хорошо изучен. Положительный эффект от его применения достигается за счет снижения концентрации напряжений в месте перехода шва на основной металл, деформационного упрочнения поверхностного слоя металла и создания остаточных напряжений сжатия в зоне концентратора.

В настоящее время актуальным остается контроль качества проковки, эффективность которой во многом зависит от выбранных инструмента и скорости обработки конструкций, эксплуатация

которых происходит в условиях циклического нагружения.

В работе [6], например, оптимальную скорость перемещения обрабатывающего инструмента оценивали по образованию в поверхностном слое изделия максимальных остаточных напряжений сжатия, полученных при скорости обработки 0,3...0,5 м/мин.

В исследованиях, проведенных в ИЭС им. Е. О. Патона, эффективность ВМП оценивают по измерению твердости дна наклепанного слоя [7]. Установлено, что указанная твердость достигает максимального значения при скорости наклепа, равной 0,5 м/мин за четыре прохода, т. е. при скорости ВМП  $v = 0,125$  м/мин, которая определяется как отношение длины наклепанного шва ко времени наклепа. Проведены сравнительные усталостные испытания разных типов сварных соединений в условиях асимметрии нагружения [8, 9], которые продемонстрировали эффективность ВМП с указанной скоростью. В работе [10] предложена скорость обработки 0,3...0,5 м/мин с визуальным контролем ее качества. В этом случае при качественно выполненной ВМП формируется канавка глубиной до 0,5 мм, с помощью которой устраняются острые подрезы.

В настоящее время ВМП осуществляется вручную посредством специального инструмента. Некачественно выполненная обработка может не обеспечить ожидаемого эффекта, поскольку все зависит от опыта работы с инструментом и правильного выбора скорости наклепа.

Цель исследований состоит в поиске простого и надежного критерия оценки эффективности ВМП, особенно на стадии эксплуатации сварных конструкций.

В настоящей работе влияние ВМП оценивали по результатам испытаний на усталость стыковых соединений низкоуглеродистой стали СтЗсп на установке ДСО-2 [11] при отнулевом цикле гармо-

нического нагружения в условиях изгиба. Образцы изготавливали из листовой стали толщиной 14 мм размером 40×400 мм. В ИЭС им. Е. О. Патона обработку зоны сплавления металла шва с основным металлом осуществляли посредством ультразвукового пьезокерамического инструмента USP-300 [12] с частотой колебаний 22 кГц, амплитудой колебаний торца волновода 19 мкм и потребляемой мощностью 0,3 кВт. Деформирующий механизм представлял собой специальную головку со встроенными в нее в один ряд четыре стальных стержнями диаметром 3 мм. При ВМП сварного соединения, если инструмент перемещать вдоль линии сплавления металла шва с основным металлом, образуется канавка шириной 3,0...3,5 мм и различной глубины  $h$ , зависящей от времени обработки, т. е. от скорости перемещения рабочего инструмента вдоль шва. Результаты испытаний образцов при напряжении от внешней нагрузки  $\sigma_{\max} = 375$  МПа показали, что с увеличением глубины канавки их долговечность увеличивается (рис. 1). Причем между глубиной и долговечностью существует удовлетворительная корреляция. Начиная с глубины  $h = 0,14$  мм, которая получена при обработке со скоростью 0,065 м/мин, трещины усталости в сварных образцах, испытанных на базе  $N = 10$  млн цикл, не образовывались. Таким образом, на основе полученных результатов исследований можно заключить, что оптимальным режимом обработки стыковых соединений стали СтЗсп по критерию долговечности будет считаться такой, который обеспечит глубину канавки не менее 0,14 мм. В работах [7, 10] содержатся сведения о том, что при глубине канавки  $h = 0,2...0,5$  мм после качественно выполненного упрочнения ВМП перенаклеп металла не происходит. Однако эти данные имеют справочный характер и не могут служить основой выбора критерия оценки повышения прочности сварного соединения.

Чтобы оценить эффективность ВМП с учетом разных технологий изготовления образцов и навыков работы с инструментом, проведены сравнительные испытания образцов трех серий.

Первая серия образцов ВМП не подвергалась, т. е. образцы находились в исходном после сварки состоянии. Испытывали по несколько образцов в основном на четырех уровнях напряжений. Образец считался разрушенным, если трещина усталости достигала длины 10 мм. Результаты испытаний образцов (светлые кружочки), обработанных методом наименьших квадратов, представлены на рис. 2, кривая 1. Предел выносливости составил 200 МПа.

Вторая серия образцов изготовлена из сварной пластины длиной 1000 мм и шириной 400 мм с предварительно проклепанным сварным швом. ВМП сварного шва была намеренно поручена не-

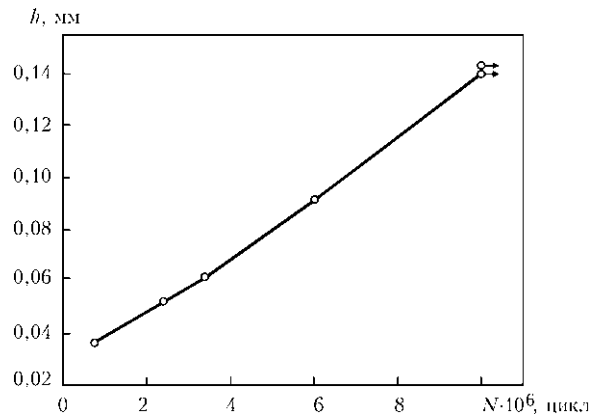


Рис. 1. Зависимость долговечности сварного образца из стали СтЗсп со стыковым швом от глубины канавки в зоне наклепа

обученному оператору, не имеющему опыта работы с инструментом, с целью проверки, как может повлиять выполненная неквалифицированным оператором ВМП сварных соединений на долговечность конструкций при их циклическом нагружении. После обработки пластину разрезали на образцы установленных размеров (40×400 мм). Результаты испытаний таких образцов представлены на рис. 2 темными и светлыми треугольниками. На рисунке виден существенный разброс значений долговечности. При визуальном осмотре установлено, что на некоторых образцах второй серии в зоне наклепа оставались несглаженные следы от бойков, имели место также наплывы металла. С целью анализа причин разброса результатов испытаний выполнены фотографии зон разрушения, из которых видно, что в некоторых образцах трещина усталости развивалась по дну наклепа (рис. 3) к краю и центру образца. Зарождение трещины происходило на расстоянии 5...7 мм от торца образца. После выхода трещины на край образца испытания прекращали. Анализ результатов испытаний таких образцов (светлые треугольники), обработанных методом наименьших квадратов (кривая 2 на рис. 2), показал, что ВМП повысила их предел выносливости на 36 %. В некоторых образцах конфигурация канавки была

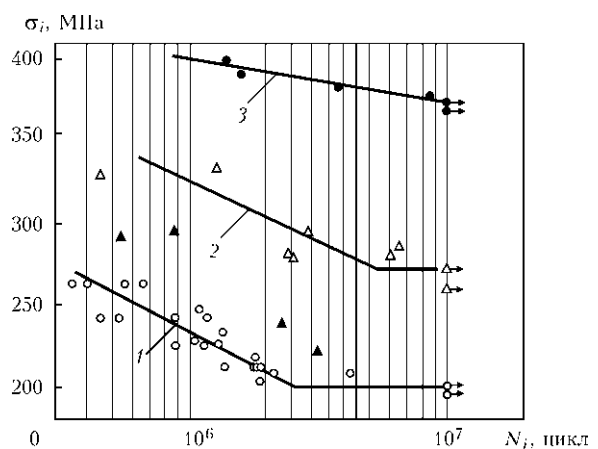


Рис. 2. Кривые усталости образцов стыковых соединений стали СтЗсп первой (1), второй (2) и третьей (3) серий

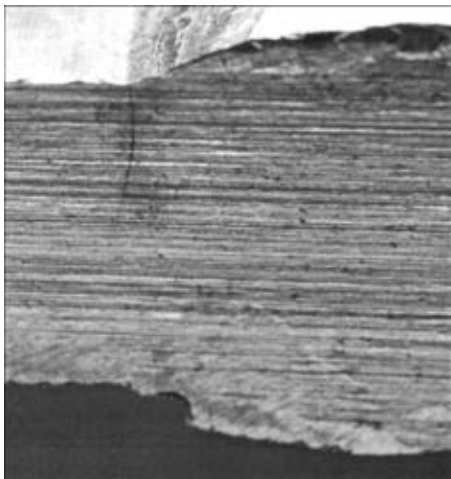


Рис. 3. Вид сбоку образца с трещиной усталости

неплавной, имелись характерные наплывы (гребешки) металла (рис. 4), которые образовались в результате некачественной проковки линии сплавления металла шва с основным металлом. В этом случае трещина усталости начинала развиваться не по дну наклепа, а из гребешков, которые стали источниками концентрации напряжений. На рис. 2 видно, что долговечность сварных образцов с такими дефектами в 3–4 раза меньше (темные треугольники). В результате повышение предела выносливости составило 11 %. Полученные результаты свидетельствуют о том, что отступление от оптимальных режимов обработки и недостаточная обученность оператора могут приводить к снижению качества наклепа, а следовательно, к существенному снижению эффективности проковки.

Третья серия образцов от второй отличалась порядком их подготовки. Предварительно сварную пластину разрезали на образцы. Затем каждый образец подвергали обработке со скоростью 0,065 м/мин при соблюдении всех норм выполнения технологии ВМП. Амплитуда колебаний торца волновода рабочего инструмента составляла 19 мкм. Такой порядок подготовки образцов позволил создать и сохранить остаточные напряжения сжатия. Измеренная глубина канавки зоны наклепа колебалась в пределах 0,14...0,16 мм, а ее ширина составляла примерно 3,0...3,5 мм. Результаты испытаний представлены на рис. 2 (кривая 3, темные кружочки). Предел выносливости сварных образцов после такой обработки составил 375 МПа, что на 87 % выше, чем у таких же образцов в исходном состоянии. Особенностью испытаний является то, что трещины усталости в образцах первой и второй серий зарождались на расстоянии 5...7 мм от края образца и распространялись одновременно к его краю и в центр; в образцах третьей серии трещина усталости зарождалась на таком же расстоянии от края образца и распространялась всегда к его краю. В образцах первой серии трещины усталости также возникали

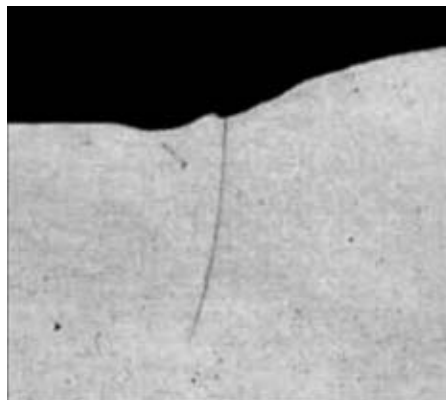


Рис. 4. Вид сбоку образца с трещиной усталости, образовавшейся в зоне напыла металла в результате отступления от технологии проковки сварного шва

в центре. Это подтверждает полученные ранее экспериментальные данные [7] о том, что в околошовной зоне соединения после ВМП остаточные напряжения сжатия увеличиваются в направлении к центру образца, на его краях их значения существенно уменьшаются. В образцах третьей серии эпюра напряжений сжатия, по-видимому, такая же, этим и объясняется наблюдаемая закономерность распространения трещины усталости. Разницу между пределами выносливости образцов второй и третьей серий можно объяснить, во-первых, качеством наклепа, а во-вторых, порядком изготовления образцов: порезка пластины на образцы в первом случае осуществлялась после наклепа, в результате чего произошла релаксация сжимающих остаточных напряжений.

Как показали результаты испытаний, скорость ВМП не может быть достаточным критерием качества обработки. Кроме того, проконтролировать ее в производственных условиях достаточно сложно. Поскольку после ВМП сварного соединения образуется канавка, зависящая от скорости перемещения рабочего инструмента вдоль шва, можно предположить, что ее глубина наряду с величиной измеренной твердости на дне канавки станут более объективным критерием эффективности ВМП сварных конструкций на стадии их эксплуатации или изготовления, чем скорость обработки.

## Выводы

1. Долговечность сварного соединения, упрочненного технологией ВМП, зависит от глубины канавки, образуемой в зоне наклепа, поэтому одним из объективных критериев оценки эффективности упрочнения сварных соединений технологией ВМП (если ее нельзя оценить прямыми испытаниями на усталость) является измерение глубины канавки.

2. Предел выносливости сварного стыкового соединения стали СтЗсп после ВМП с рекомендованной скоростью 0,065 м/мин и образованием

канавки в зоне наклепа глубиной 0,14...0,16 мм повышается на 87 %. Нарушение технологии обработки может существенно снизить ее эффективность при эксплуатации сварного соединения в условиях изгиба, когда максимальные напряжения действуют на поверхности в зоне расположения характерных напылов металла по краю канавки. В исследуемых образцах это привело к повышению предела выносливости соединений всего на 11 %.

3. Эффективность повышения сопротивления усталости сварных соединений зависит как от выбранного режима ВМП, так и от профессионализма оператора, выполняющего обработку соединений. В связи с этим к выполнению работ по ВМП сварных швов должны допускаться операторы, прошедшие специальный курс обучения.

1. Труфяков В. И. Усталость сварных соединений. — Киев: Наук. думка, 1973. — 213 с.
2. Аснис А. Е., Иващенко Г. А. Повышение прочности сварных конструкций. — Киев: Наук. думка, 1978. — 193 с.
3. Лобанов Л. М., Кир'ян В. Л., Книш В. В. Підвищення ресурсу зварних металоконструкцій високочастотною механічною проковкою // Фізико-хім. механіка матеріалів. — 2006. — № 1. — С. 56–61.
4. Снижение остаточных сварочных напряжений УЗ обработкой / И. Г. Полоцкий, А. Я. Недосека, Г.И. Прокопенко и др. // Автомат. сварка. — 1974. — №5. — С. 74–75.
5. Повышение сопротивления усталости сварных соединений металлоконструкций высокочастотной механической проковкой (Озор) / Л. М. Лобанов, В. И. Кирьян, В. В. Кныш, Г. И. Прокопенко // Там же. — 2006. — № 9. — С. 3–11.
6. Остаточные напряжения при упрочнении сварных соединений стали ЮЗ ультразвуковым инструментом ударного действия / В. Г. Степанов, Е. Ш. Статников, М. И. Клестов, Е. М. Шевцов // Технология судостроения. — 1974. — № 7. — С. 32–34.
7. Книш В. В., Кузьменко А. З., Войтенко О. В. Повышение сопротивления усталости сварных соединений высокочастотной механической проковкой // Автомат. сварка. — 2006. — № 1. — С. 43–47.
8. Повышение сопротивления усталости сварных соединений конструкций ультразвуковой ударной обработкой / П. П. Михеев, Э. Ф. Гарф, А. З. Кузьменко и др. // Проблемы сварки и специальной электрометаллургии. — Киев: Наук. думка, 1990. — С. 41–47.
9. Кудрявцев Ю. Ф., Коршунов В. Ф., Кузьменко А. З. Повышение циклической долговечности сварных соединений ультразвуковой ударной обработкой // Автомат. сварка. — 1989. — № 7. — С. 24–28.
10. ЦП-0176. Рекомендації з огляду, підвищення та збільшення експлуатаційного ресурсу суцільноступінчастих зварних прогонових будов. — К.: Укрзалізниця, 2007. — 42 с.
11. Дегтярев В. А. Установки типа ДСО для испытаний на усталость при повторном ударном нагружении с различной асимметрией цикла // Пробл. прочности. — 1982. — № 10. — С. 110–113.
12. Пат. 47536 Україна. Пристрій для ультразвукової ударної обробки металів / Г. І. Прокопенко, Я. І. Клейман, О. В. Козлов та ін. — Опубл. 15.07.2002.

The paper gives the results of fatigue testing of butt welded joints produced by different joining technologies, after high-frequency mechanical peening. It is shown that measuring the depth of the peened zone groove is one of the objective methods of assessment of the effectiveness of welded joint treatment.

Поступила в редакцию 21.04.2009

## Вниманию специалистов!

В Германии вышла в свет книга по истории электронно-лучевой сварки. В ее основу легли воспоминания авторитетных специалистов из шести разных стран, работавших и работающих сейчас в области электронно-лучевой сварки. Она раскрывает различные аспекты ее развития.

Здесь представлен личный опыт д-ра Стейгервалда (Германия) как изобретателя и предпринимателя, про которого сегодня сказали бы «получил начальный капитал от ангела-инвестора»; дана оценка техническим достижениям, описанная д-ром Сайе (Франция); рассмотрены особенности конкурентного развития электронно-лучевых компаний США (R. Bakish, D. Powers), которые сравниваются с плановой экономикой Советского Союза на примере шести промышленных комплексов, каждый из которых отвечает за определенный аспект целого (О. К. Назаренко); представлена также оценка лицензионных соглашений, начиная с Hamilton Standard до Nippon Electric Company (NEC) или Hawker Siddley, каждое с известными научно-исследовательскими организациями для продвижения технологий (Университет г. Осака в Японии и Институт сварки TWI в Великобритании); д-р Дитрих (Германия) описывает поколения от Zeiss через Hamilton Standard до Leybold/Heraeus и PTR. Д. В. Доченек обобщил информацию о деятельности во всем мире большинства университетов и компаний для того, чтобы сделать эту книгу наиболее полной.

В книге также раскрывается суть двух противоположных изобретений: д-р Стейгервалд проводил эксперименты с электронными микроскопами и открыл их потенциал для бурения и сварки. У него было решение и он искал применения. С другой стороны, перед д-ром Жак-Андре Стора стояла проблема, которую необходимо было решить: сварка химически активных материалов. Она требовала вакуумного процесса, и он нашел решение в электронно-лучевой сварке.

